

# VPLIV ARMIRANJA LESENIH LEPLJENIH NOSILCEV

UDK 624.07  
COBISS 1.02 pregledni znanstveni članek  
prejeto 1.4.2004

*The effect of reinforcement on glued laminated beams*

## izvleček

Pri običajni konstrukcijski kvaliteti lesa je projektna nosilnost na tlačno obremenitev večja od natezne. Pogosto se zgodi, da je natezna porušitev merodajnejša od drugih tipov porušitev še posebno v primeru, ko za konstrukcijo izberemo cenejšo oziroma slabšo kvaliteto lesa z večjo vsebnostjo grč. Ob pomoči natezne armature lahko tako uporabljamo les slabše kvalitete. V članku so podani izsledki simulacij armiranja lesenih nosilcev iz različnih materialov in različnih odstotkov armiranja.

## abstract

*With normal quality of structural timber the designed compressed strength is greater than tension strength. However, often tension damage is the better measure than other types of damage, especially when timber of lesser quality, lower price or with more knots is chosen for the structure. By introducing tension reinforcement we can nevertheless also use timber with lesser quality for such purposes. The article presents findings from simulated reinforcement of timber beams of various materials and with different shares of reinforcement.*

## ključne besede:

konstrukcija, lepljen lameliran les, ojačitev, kompozit

## key words:

structure, glued laminated timber, reinforcement, composite

Pri gradnji objektov je potrošnja gradiv relativno velika in zato ni pričakovati, da je povsod in za vse sestavne dele mogoče uporabljati najboljše in najdražje materiale. To preprosto ni ekonomično in tudi ni ekološko sprejemljivo. Zato je najbolj primerno, da se posekan in razrezan les pravilno razporedi in uporabi za različne izdelke brez ostankov. Tako je povsem pravilno, da se prvovrstna kvaliteta lesa uporablja predvsem za mizarske izdelke. Za izdelavo konstrukcij v gradbeništvu je zato primerna nekoliko slabša kvaliteta lesa, ki pa mora biti še vedno ustrezna predvsem v smislu varnosti.

Zaradi specifičnih lastnosti lesa kot materiala, ki je naraven in kot tak vsebuje tudi grče, je grčavost poleg gostote lesa eden od ključnih elementov, ki vplivajo na kvaliteto lesa. Dejstvo je, da prevelika vsebnost grč povzroča krhkost lesa. Tako les na nek način postaja podoben betonu, za katerega vemo, da dobro prenaša tlačne napetosti nateznih pa ne. Takšen les izkazuje izrazito razliko med tlačno in natezno trdnostjo. Še največji povsem realen problem pa je ta, da je natezna trdnost lesa zaradi grč močno odvisna tudi od porazdelitve oz. raztrosa kvalitete lesa. Če takšnemu lesu dodamo ojačilne lamele, ki zaščitijo nosilec pred prehitrim pretrgom natezne cone, potem se izboljša celotna zanesljivost takega konstrukcijskega elementa.

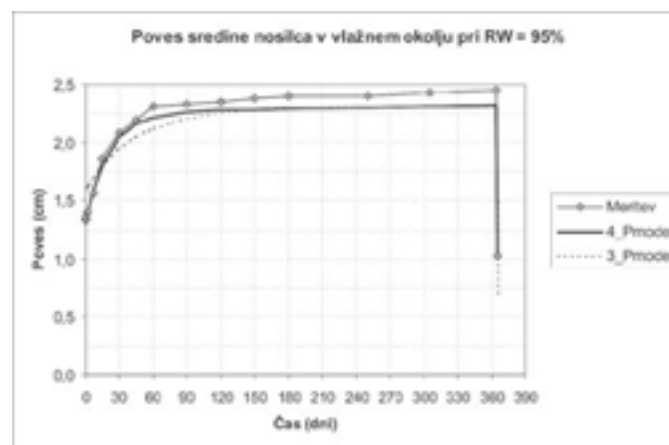
## Mehanske lastnosti lesa

Osnovne mehanske lastnosti lesa, ki so pomembne pri projektiranju konstrukcij so: natezna, tlačna in strižna trdnost ter elastični modul lesa. Seveda poleg osnovnih lastnosti so pogosto potrebne še druge odvisno od zahtevnosti konstrukcije.

Pri običajnem projektiranju obstaja tudi s standardi dovoljeno poenostavljeno dimenzioniranje. Tako pogosto vpliv lezenja zanemarimo ali pa ga le ocenimo na osnovi reduciranih elastičnih modulov. Še redkeje pa se zgodi, da bi projektant upošteval mehanosorptivni vpliv ali pa razliko med elastičnim modulom za

tlačno območje in elastičnem modulu za natezno območje. Prav tako se redko upošteva vpliv vlaženja in sušenja ter s tem povezano nabrekanje in krčenje lesa.

Vpliv lezenja lesa je močnejše izražen v primerih vlažnega okolja in je odvisen od obtežbe. Kombinacija visokega nivoja obremenitve in vlage lahko povzroči tudi do dvakratno povečanje povesov pri nosilcih. To nikakor ni zanemarljiv vpliv (*sliki 1 in 2*).



### Pomen oznak v legendi:

4\_Pmodel = izračunani povesi s 4-parametričnim modelom

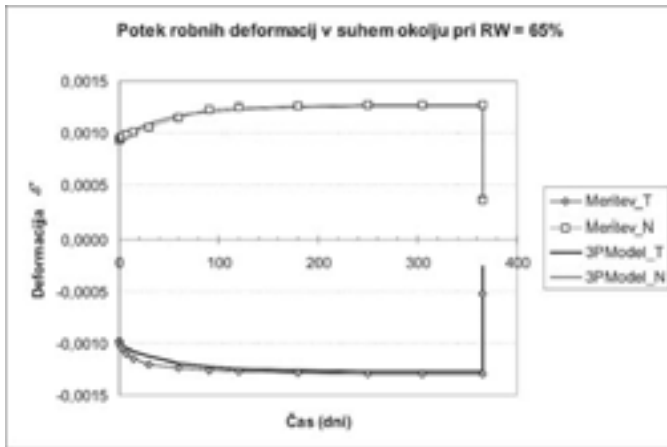
3\_Pmodel = izračunani povesi s 3-parametričnim modelom

### Meaning of symbols in the key:

4\_Pmodel = calculated bending with 4-parametrical model

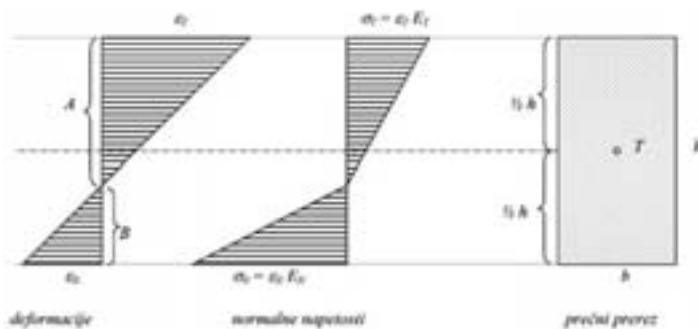
3\_Pmodel = calculated bending with 3-parametrical model

Slika 1: Primerjava izmerjenih povesov in računalniško simuliranih z upoštevanjem lezenja lesa.  
*Comparison of measured and computer-simulated bending, with respect to creeping.*



Slika 2: Primerjava izmerjenih robnih deformacij in računalniško simuliranih z upoštevanjem lezenja.  
*Comparison of measured and computer-simulated edge deformations, with respect to creeping.*

Tudi mehanosorptivni efekt ima lahko za posledico izjemno povečanje deformacij, enakega velikostnega razreda kot lezenje, ki nastanejo zaradi nihanja vlage v lesu. Ta vpliv je pri velikih prerezih bistveno manjši kot pri majhnih prerezih in je zato zelo redko obravnavan v praksi. Vseeno je priporočljivo uporabljati ustrezne premaze za les, ki zadržujejo čim bolj konstantno vlago znotraj prereza lesa.



Slika 3: Normalne napetosti in deformacije poenostavljeni linearni model.  
*Normal tensions and deformations: simplified linear model.*

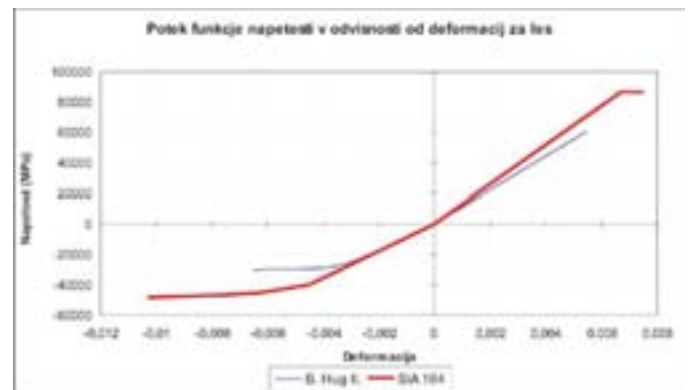
Razliko med elastičnim modulom za tlačno območje  $E_T$  in elastičnem modulu za natezno območje  $E_N$  v praksi praktično nikoli ni upoštevano (slika 3). Razlog za to je povsem preprost in sicer v naravi statike linijskih konstrukcij. Znano je, da na pomike in zasuke konstrukcije v največji meri vplivajo upogibni momenti in v veliko manjši meri osne in prečne sile. S tem razlogom so nekateri enostavni računalniški programi pri izračunu pomikov in zasukov zasnovani tako, da upoštevajo le deformacije odvisne od upogibnih momentov. Če poleg opisanega pri upogibni togosti elementov upoštevamo povprečni upogibni elastični modul  $E$ , ki ga določimo iz upogibnih preizkusov, potem na zunaj vidne razlike praktično ni. Vidimo namreč le konstrukcijo in njeno deformacijo (povese) ne pa tudi lokalno deformacijo materiala - vlakna.

Prav tako najpogosteje na zunaj opazimo le porušitev natezne cone lesenega nosilca in to običajno napačno povežemo z manjšo nosilnostjo lesa v natezni coni (slika 4).



Slika 4: Porušitev natezne cone lameliranega lepljenega lesenega nosilca iz običajne II. kvalitete lesa.  
*Damage on a laminated glued timber beam of ordinary II. quality timber in its tension zone.*

V resnici se lahko zgodi oboje in sicer, da je za porušitev natezne cone dejansko kriva prevelika količina grč ali pa, da se to zgodi zaradi sposobnost plastifikacije v tlačni coni, ko robne natezne napetosti pri povečanju obtežbe naraščajo hitreje od tlačnih in tako tudi hitreje dosežejo mejo trdnosti (slika 5).



Slika 5: Potek funkcije napetosti odvisnih od deformacij za les iglavcev II. kvalitete po podatkih raziskav B. Hug-a, ter predpostavljeni potek za lesene konstrukcije po standardu SIA 164 .  
*Progress of the tension function, depending on deformations for II. quality coniferous timber according to B. Hug's research results and hypothetical progress for timber constructions according to the SIA 164 standard.*

Bistvena razlika med krivuljama prikazanega diagrama je opazna predvsem izven linearnega območja, kjer se izkaže razlika v kvaliteti materiala. Očitno se po standardu SIA zahteva večja kvalitete lesa. Zelo pogosto preiskave kažejo na to, da natezna cona nima nikakršne sposobnosti plastifikacije kot jo predpostavlja SIA in zato vedno krhko počí. V tlačni coni pa plastifikacija običajno vedno nastopi, razlika je le v velikosti tovrstnega odziva.

V kolikor bi želeli uporabljati še slabšo III. kvaliteto lesa pa se prav zaradi velike vsebnosti grč natezna trdnost v primerjavi s tlačno bistveno bolj zmanjša in praktično razpolovi. To kažejo tako razmerja med dopustnimi napetostmi po JUS standardih kot tudi razmerja med projektnimi trdnostmi po EC5. Nosilci izdelani iz takšne kvalitete lesa so prav gotovo še posebej potrebni armiranja oziroma ojačanja natezne cone. Dejstvo je, da je takega lesa dovolj, cena pa temu primerno nizka in prav zato bi bilo smiselno izrabiti dani potencial.

### Mehanske lastnosti ojačitev

Ojačitve izvedene z dolepljenjem lamel na lepljeni nosilec so lahko iz najrazličnejših materialov. Za lamele se lahko uporabijo karbonske lamele, lamele iz steklenih vlaken ali pa celo lamele iz običajnega ploščatega jekla S235.

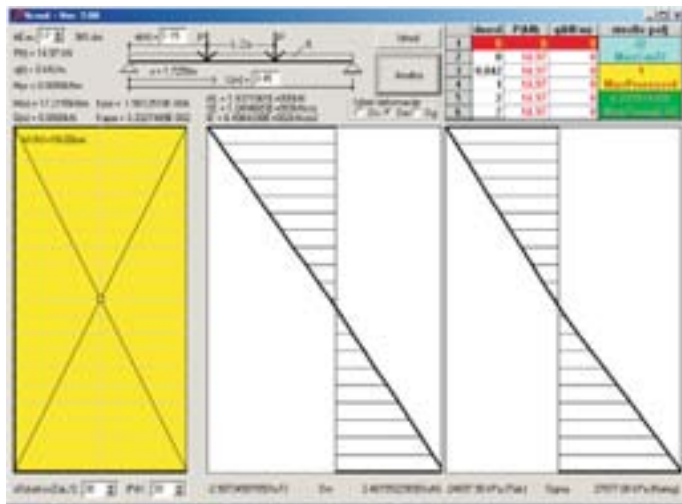
Lamela	vrsta	E(kN/cm <sup>2</sup> )	f <sub>y</sub> (kN/cm <sup>2</sup> )
Sika CarboDur S	karbon	15500	240
Sika CarboDur M	karbon	21000	200
Sika CarboDur H	karbon	30000	140
FiRP GARP	steklo- aramid	5516	24.1
FiRP CARP	karbon - aramid	11446	83.4
FiRP ARP	aramid	7998	98.6
Jeklo S235	jeklo	21000	24

Slika 6: Mehanske lastnosti različnih ojačilnih lamel.  
*Mechanical properties of various reinforcement lamellas.*

Mehanske karakteristike ojačitev so, kot je prikazano v *sliki 6* izjemno raznovrstne. Karbonske lamele so najdražje z najvišjo natezno trdnostjo, bistveno cenejše in tudi slabše pa so lamele iz steklenih vlaken in običajnega jekla.

### Vpliv "odstotka" armiranja

V okviru analize nosilnosti z jeklom armiranih lamel smo s programom Scout simulirali armiranje lepljenega lameliranega lesenega nosilca dimenzij b/h = 10/20cm.

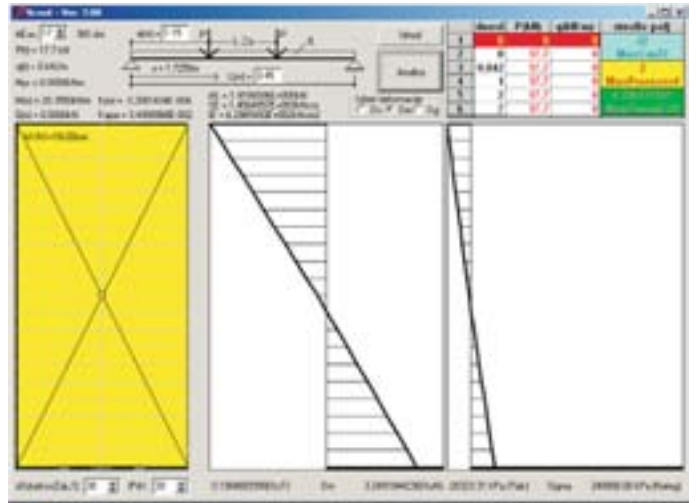


Slika 7: Simulacija nearmiranega lepljenega nosilca po enoletni obremenitvi s P = 14,97kN.  
*Simulation of non-reinforced glued beam after 1 year of loading where P=14,97 kN.*

Predpostavili smo, da gre v primeru lesa za material slabše II. kvalitete, kjer je vsebnost grč takšna, da je natezna trdnost lesa reducirana in je enaka tlačni trdnosti (*slika 5*). Prostoležeči nosilec podpremo na razdalji 3.45 m in ga obremenimo z vertikalno koncentrirano obtežbo P v tretjinah razpona. Nato spreminjamo "odstotek" armiranja in preverjamo uspešnost armiranja.

Kot lahko opazimo v *sliki 10* je uporaba armature z več kot 9% površine jekla v primerjavi s površino lesa v prečnem prerezu nosilca povsem nesmiselno, saj nosilnost ne narašča. Prav tako je

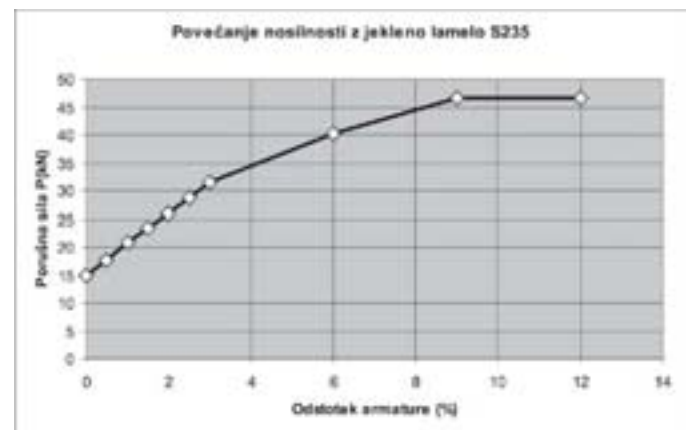
iz podatkov iz *slike 9* opaziti, da za 2-kratno nosilnost zadostuje 3% armiranja medtem ko za 3-kratno nosilnost potrebujemo kar 9% armiranja. Tako je očitno, da se težišče ekonomičnosti armiranja giblje v okviru tri odstotnega armiranja.



Slika 8: Simulacija armiranega lepljenega nosilca s 5% jekla S235 po enoletni obremenitvi s P = 17,7kN.  
*Simulation of glued beam with 5% of S235 steel reinforcement after 1 year of loading where P=17,70 kN.*

Armiranje (%)	P(kN)	w(cm)	koef. nosilnosti
0	14.97	4.22	1.000000
0.5	17.70	4.34	1.182365
1	20.90	5.02	1.396126
1.5	23.50	5.18	1.569806
2	26.00	5.34	1.736807
2.5	28.80	5.33	1.923848
3	31.50	5.69	2.104208
6	40.30	5.03	2.692051
9	46.50	4.24	3.106212
12	46.70	4.27	3.119572

Slika 9: Vpliv "odstotka" armiranja na povečanje nosilnosti P za jeklene lamele.  
*The effect of "share" of reinforcement on increased load-bearing capacity P for steel lamellas.*



Slika 10: Grafični prikaz vpliva "odstotka" armiranja (%) na povečanje nosilnosti P(kN).  
*Graphic presentation of effects of "share" of reinforcement on increased load-bearing capacity P (kN).*

### Vpliv tipa lamele za armiranje in načina lepljenja

Analize so pokazale, da je jeklo S235, ki ima relativno nizko mejo elasto-plastičnosti v primerjavi s karbonskimi lamelami nesmiselno prednapenjati, saj je jeklo cenovno zelo primeren material, ki pa ima žal tudi slabe lastnosti v povezavi s toplotno prevodnostjo, kondenzacijo in korozijo.

Karbonske lamele tipa S imajo nekoliko manjši elastični modul kot jeklo in jim je potrebno vsiliti velik raztezek, da se jih polno obremenijo in zato je predkrivljenje oz. prednapetje priporočljivo, saj s tem dosežemo enak učinek z manj materiala ali pa večji učinek z enakim materialom. Pri visoko kvalitetnem jeklu bi lahko privzeli enake smernice, medtem ko pri mehkem jeklu S235 zelo hitro dosežemo mejo elasto-plastičnosti in zato prednapetje ni smiselno.

Armiranje (%)	P(kN)	Ppr(kN)	koef. nosilnosti
0	14.97	0	1.0000
0.6	24.40	0	1.6299
0.6	28.50	-15	1.9038

Slika 11: Vpliv predkrivljenja Ppr na nosilnost P za karbonske lamele Sika S 1012.

*Effect of pre-bending Ppr on load-bearing capacity P for carbon laminates Sika S 1012.*

Armiranje lesenih lepljenih nosilcev je lahko raznovrstno, največkrat ojačujemo le natezno cono in s tem lahko rešujemo problem prevelike grčavosti. V novejšem času se razvija tudi armiranje s FRP lamelami tudi v tlačni coni lesenega lepljenega lameliranega nosilca s čimer se v bistvu ustvarja nekakšen "I" profil. Seveda je najbolj uporabno le armiranje natezne cone v primeru slabega močno grčavega lesa. V kolikor je mogoče uporabiti običajno jeklo, je to cenovno še najenostavnejša rešitev. Za jeklene lamele velja, da je ekonomsko smiselno 3 odstotno armiranje prereza, nikakor pa ne 9 odstotno in več. Armiranje nosilcev s karbonskimi lamelami postane cenovno sprejemljivo le ob sočasni uporabi tehnologije predkrivljenja. Ne glede na vrsto uporabljenega materiala pa armiranje poleg povečanja varnosti konstrukcije zelo ugodno vpliva tudi na zmanjšanje viskoznih deformacij zaradi lezenja lesa.

### Viri in literatura

- Deuring M., Steiner W., Efficient strengthening by using the Sika CarboDur System, Sika AG Zuerich, Winterthur 1996, Switzerland
- Habib J. Dagher, J. Breton, Creep Behavior of FRP-Reinforced Glulam Beams, 5th World Conference on Timber Engineering, Proceedings Vol. 1, EPFL, Lousane 1998, str. 161-168
- Noel D. Stevens and George K. Criner, Economic Analysis of Fiber-Reinforced Polymer Wood Beams, University of Maine, 2000
- Srpčič J., Magistrsko delo: Vpliv vlage na reološke lastnosti lepljenih lameliranih nosilcev, Univerza v Ljubljani, FGG, Ljubljana 1992
- Wallner E., 2001, Predkrivljen lepljen lameliran nosilec, Zbornik 23. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled
- Wallner E., 2002, Izboljšani leseni lamelirani nosileci, Zbornik 24. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled
- Wallner E., 2002, Postopek povečanja upogibne nosilnosti s predkrivljenjem, Patent SI 20759 A
- Wallner E., 2003, Magistrsko delo: Predkrivljeni lepljeni lamelirani leseni nosilec, Univerza v Ljubljani, FGG, Ljubljana
- Wallner E., 2004, Raziskovalna naloga: Ojačitve lesenih nosilcev, Univerza v Ljubljani, FA, Ljubljana